

Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Мусихин С.А., Юдин Ю.В.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург  
20983@rambler.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Предлагаемая методика моделирования процесса охлаждения изделий простой формы основана на решении задачи теплопроводности в одномерной постановке методом конечных разностей и может быть реализована в большинстве общедоступных программных сред, таких как Microsoft Excel, OpenOffice и т. д. Это позволяет значительно сократить объем проводимых вычислений.

Алгоритм расчета основан на методе Шмидта [1], подразумевающим разбиение изделия по толщине (радиусу) на несколько слоев. Согласно этому методу, основным уравнением для расчета температурного поля по сечению изделия является следующее выражение:

$$t_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x} = \frac{1}{f} (t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} + (f-2)t_{n\Delta\tau, m\Delta x} + t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x}), \quad (1)$$

где  $f$  – размерность шаблона,  $t_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x}$  – температура данного слоя в настоящий момент времени,  $t_{n\Delta\tau, m\Delta x}$  – температура данного слоя в предыдущий момент времени,  $t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x}$  и  $t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x}$  – температуры соседних слоев в предыдущий момент времени. Для обеспечения требуемой точности расчетов необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{\mu \cdot fa}, \quad (2)$$

где  $\Delta\tau$  – шаг по времени, с,  $\Delta x$  – толщина слоя, м,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\mu = 3$  – поправочный коэффициент, определенный из условия наилучшей адекватности расчетных и экспериментальных траекторий охлаждения по критерию Фишера.

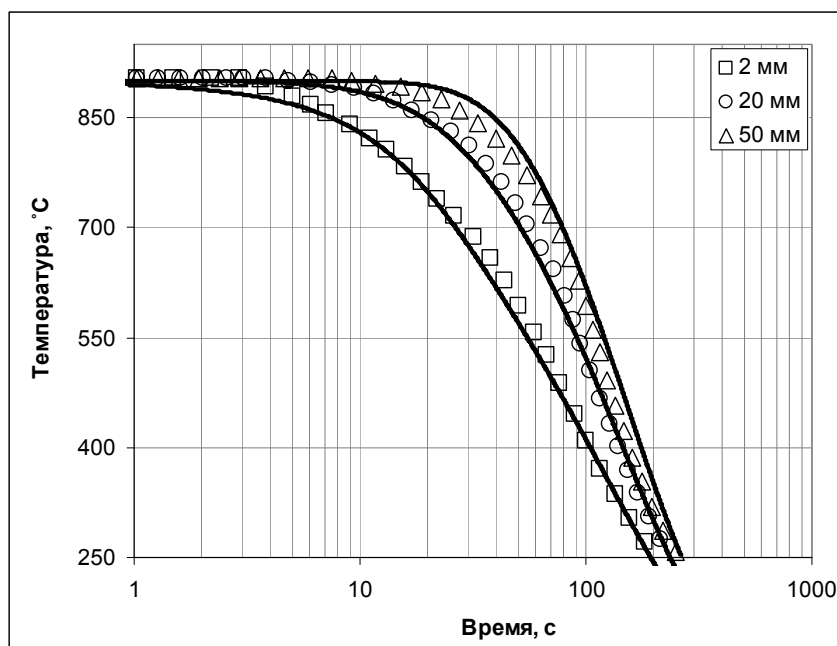
Используя метод конечных разностей, можно выразить температуру поверхности изделия с учетом граничных условий:

$$t_{n\Delta\tau, 0\Delta x} = \frac{\alpha\Delta x t_0 + \mu \cdot \lambda t_{n\Delta\tau, 1\Delta x}}{\mu \cdot \lambda + \alpha\Delta x}, \quad (3)$$

где  $t_{n\Delta\tau, l\Delta x}$  – температура первого слоя изделия в данный момент времени, °C,  $t_0$  – температура охлаждающей среды, °C,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К.

В общем случае исходными данными для расчета являются: теплофизические свойства стали в аустенитном состоянии (коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/м·К, удельная теплоемкость  $c_p$ , Дж/кг·К, плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>), температура охлаждающей среды  $t_0$ , °C, температура нагрева изделия  $t_n$ , °C. Коэффициент теплоотдачи при охлаждении принимается переменным в зависимости от температуры поверхности.

Для проверки адекватности модели проведен расчет температурного поля при охлаждении в масле цилиндров из стали 40X, результаты которого сравнивались с экспериментальными данными [2] (рис. 1). В результате траектории охлаждения, определенные расчетным методом по предложенной методике, с технической приемлемой точностью совпадают с результатами экспериментальных данных, при этом отношение табличного критерия Фишера к расчетному ( $F_{\text{табл}}/F_{\text{расч}}$ ) составляет не менее 360.



б

Рис. 1. Траектории охлаждения разных точек сечения цилиндра диаметром 100 мм из стали 40X при охлаждении в масле. Точки – экспериментальные данные [2], линии – расчет

### **Список источников**

1. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
2. Романов П. В., Радченко В. П. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении стали: Атлас термокинетических диаграмм. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. АН СССР, 1960. 51 с.